

# **DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES POR METODOLOGÍA RACIONAL**

## **Grupo CECATA, Universidad Javeriana**

**Fredy Reyes Lizcano**, Ing PhD, Profesor Asociado, investigador en pavimentos  
Director de la Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos de  
la Universidad Javeriana.

### **RESÚMEN**

La metodología racional basada en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las interfaces de las capas del pavimento Asfáltico, permiten el diseño óptimo y durable de pavimentos ya que se puede verificar su vida útil con respecto a las admisibilidades propias de cada capa del pavimento. El método hace uso de la teoría de la elasticidad y aplicación de las leyes de fatiga de las capas, integrando modelos matemáticos de Burmister, y las rutinas de calculo Alize III. A nivel experimental se integra la medición de Módulos Elásticos y Leyes de Fatiga para las capas asfálticas, granulares, y suelos por medio de equipos Triaxiales, el NAT, Nottingham asphalt test .

La modelación se ha adaptado para ser compatible con el programa DEPAV, y su uso simple, hace ésta metodología muy sencilla comparada con métodos de cálculo de pavimentos. Sirviendo tanto para pavimentos flexibles, rígidos, semirígidos o estructuras no convencionales como los Geobloques. Esta metodología de gran aceptación y validada en Europa, se ha venido aclimatando al caso de la malla urbana de Bogotá Colombia.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Este artículo presenta los datos necesarios para la aplicación del método de diseño racional. Los datos se clasifican en cuatro categorías:

- El tránsito
- Los parámetros de base de cálculo: Trata de los parámetros de cálculo cuya escogencia de valores se basan en el análisis de la función económica de la calzada del pavimento.
- Los datos climáticos y del ambiente: Esto agrupa los datos descriptivos de las condiciones climáticas del sitio del proyecto que tienen una influencia directa sobre la selección de las variables de cálculo.
- Los Parámetros descriptivos de los materiales: Este conjunto corresponde a las propiedades de los materiales de calzada y del soporte que son necesarias en el cálculo de estructura de la calzada, en base a los módulos dinámicos, coeficiente de Poisson y leyes de fatiga.

## **1.1. EL TRANSITO**

El conocimiento de los vehículos pesados interviene en:

- Como el criterio de la selección de las calidades de ciertos constituyentes que entran en la fabricación de los materiales de la calzada por ejemplo: La dureza de los granulares.
- Como parámetro de entrada para el análisis mecánico del comportamiento a la fatiga de la estructura de calzada.
- Son definidos como pesos pesados los vehículos cuya carga útil es superior o igual a 5 Toneladas.

Una primera información sobre el volumen diario del tránsito de vehículos pesados generalmente es suficiente sin necesidad que se detalle su composición y esta información debe referirse a la noción de la clase de tránsito.

Para el cálculo del dimensionamiento, este tránsito acumulado sobre la duración inicial de vida se tomará en cuenta en consideración a través de la noción del tránsito equivalente.

### **1.1.1. LAS CLASES DE TRÁNSITO**

La clase de tránsito está determinada a partir del tránsito de los vehículos pesados por sentido teniendo en cuenta el promedio anual diario para la vía más cargada en el año de puesta en servicio.

En el caso de calzadas de dos vías de pequeño ancho, inferior a 6 m, para tener en cuenta el recubrimiento de las bandas de rodadura se tendrá en cuenta la regla siguiente para calcular el tránsito anual diario promedio.

- Si el ancho es inferior a 5 m, asumir el 100% del tránsito total de los dos sentidos
- Si el ancho esta comprendido entre 5 y 6 m, asumir el 75% del tránsito total de los dos sentidos

En el caso de calzadas que comprenden vías separadas, el carril más cargado es generalmente la vía lenta, si no se tiene información sobre la repartición probable del tránsito entre las vías se tomará como sigue:

Calzadas rurales:

- Vías de dos por dos calzadas. Se tomará 90% de los vehículos pesados en el sentido considerado y 10% en el carril rápido

- Si las vías son de dos por tres. Se considerará el 80% en la vía lenta, en la vía media el 20%, en la vía rápida o de sobrepaso 0%

Vías dentro del perímetro urbano:

- En las vías de dos por dos calzadas se debe hacer un estudio particular para cada caso.
- Para las vías de dos por tres calzadas se tomará 65% para la vía lenta, 30% para la media, y 5% para la vía rápida.

### 1.1.2. EL TRÁNSITO EQUIVALENTE

Para el cálculo del dimensionamiento de la calzada el tránsito se caracteriza por el número equivalente de ejes de referencia correspondiente al tránsito de vehículos pesados acumulados en la duración inicial del cálculo retenido (vida útil).

El eje de referencia es un eje simple con ruedas gemelas cuya carga es de 130 kilo - newton. El número de ejes equivalente es función de los valores de los conteos del tránsito en el año de puesta en servicio de este, de la tasa de crecimiento durante la duración de vida, de la composición del tránsito y de la naturaleza de la estructura de la calzada. Se calcula teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$NE = N \times CAM \text{ ( factor camión)}$$

*N*: numero acumulado de pesos pesados para el período de cálculo de *P* años  
*CAM*: agresividad media de los pesos pesados con relación al eje de referencia.

Cálculo del número total *N* de pesos Pesados.

$$N = 365 \times MJA \times C$$

*C* : factor acumulado en el período de cálculo  
*MJA* : tránsito pesado promedio anual diario.

Para *P* años y una tasa de crecimiento geométrica *t* constante sobre este período se obtienen el valor de *C* por la fórmula siguiente:

$$C = \frac{[(1+i)^n - 1]}{i}$$

### 1.1.3. VALOR DEL COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD CAM

La configuración de ejes (tandem, tridem) con ruedas (simples o gemelas) y su carga son variables de un peso pesado con respecto a otro. Para una carga dada los esfuerzos y las deformaciones en la calzada a un cierto nivel son función de la

estructura de la misma, del comportamiento en la fatiga y de los daños que pueda provocar la aplicación de una carga dada, la cual depende de la naturaleza propia de los materiales. Un peso pesado no tendrá la misma agresividad si circula sobre una calzada bituminosa flexible o sobre una calzada que está compuesta y tratada por capas con ligantes hidráulicos.

## **1.2. PARÁMETROS DE LA BASE DE CÁLCULO**

En todo dimensionamiento de una estructura de calzada se debe tener en cuenta los términos probabilísticos en una primera etapa del cálculo, se debe tomar un valor de probabilidad de ruptura de la calzada en los N años de diseño; si se tiene en cuenta los conteos del tránsito esta duración inicial variará según el riesgo de los daños que se tomen, un menor daño equivale a incrementos económicos en la construcción de esta vía.

## **1.3. LOS DATOS CLIMÁTICOS Y DEL AMBIENTE**

En las condiciones climáticas se debe tener en cuenta la abundancia de las precipitaciones y los drenajes dispuestos para la vía, los ciclos estacionarios y los valores extremos de la temperatura, particularmente en las calzadas tratadas con ligantes hidráulicos en donde la durabilidad y la deformabilidad dependen de la temperatura, de la resistencia del suelo soporte y del estado hídrico de la sub-rasante.

## **1.4. LOS PARAMETROS DESCRIPTIVOS DE LA PLATAFORMA DE SOPORTE**

### **1.4.1. EL SUELO SOPORTE**

Para los cálculos de las solicitaciones en el cuerpo de la calzada bajo el eje de referencia, el suelo soporte es generalmente asimilado a un medio elástico definido por: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, estos parámetros mecánicos definen el comportamiento a largo tiempo para la parte superior de la sub-rasante; para el coeficiente de Poisson se tomará un valor medio de 0.35 sabiendo que este parámetro varía con la naturaleza de los suelos, su estado hídrico y las solicitaciones aplicadas. Se recomienda tomar el módulo como 5 CBR (en MPa) ó  $8,5 \text{ CBR}^{0.825}$  (MPa).

En el caso de las calzadas flexibles y bituminosas de gran espesor el cuerpo de la calzada debe ser dimensionado para evitar que el ahuellamiento del soporte por acumulación de las deformaciones permanentes a este nivel lleguen a deformarlo.

Para las estructuras de calzadas rígidas el criterio de la resistencia se determina por las leyes de fatiga de las capas. La deformación admisible de la subrasante,  $\tilde{\epsilon}_z$  se puede tomar:

**Tabla No. 1. Deformación Admisible en función del Tránsito.**

PAVIMENTO CON TRÁNSITO MEDIO A ALTO (T <sub>3</sub> a T <sub>5</sub> )	$\varepsilon_z = 0.012(N)^{-0.222}$
PAVIMENTO CON TRÁNSITO BAJO (T1 Y T2)	$\varepsilon_z = 0.016(N)^{-0.222}$

#### **1.4.2. LA CAPA DE BASE**

En lo que concierne a la selección de la capa de base y en la verificación del dimensionamiento del cuerpo de la calzada, dos aproximaciones son empleadas en la práctica, la primera es la más tradicional y consiste en el seleccionamiento del espesor de la capa de sub-base en función de la importancia del suelo soporte, en donde se asimila para los cálculos de la verificación de los espesores de suelo soporte más capa de sub-base un proceso de tener un masivo homogéneo que es descrito por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, se verifica el criterio sobre la deformación vertical que satisfaga los valores admisibles de la subrasante.

En el segundo método la capa de sub-base se individualiza como una capa de calzada más en el cálculo de la estructura, esta aproximación es válida en el caso donde se busca optimizar los espesores del conjunto de calzada y de la capa de sub-base en función de las características mecánicas que pueden ser obtenidas en obra con los materiales de sub-base. En este segundo caso las características mecánicas de estos materiales deben ser determinadas estrictamente en laboratorio. Cuando se utilizan capas de sub-base en materiales no tratados se debe verificar que los valores de la deformación vertical en la parte superior de la capa de la sub-base y del suelo soporte son admisibles y cuando se utilizan materiales tratados se debe verificar la leyes de fatiga adoptando los modelos propios para el caso del material que se esté utilizando.

#### **1.4.3. MATERIALES ELABORADOS DE LA CAPA DE CALZADA**

##### **1.4.3.1. Gravas no Tratadas**

- **Características intrínsecas**

El método de cálculo que se requiere para representar el comportamiento reversible bajo una carga está dado en función del modulo de Young y del coeficiente de Poisson para una grava no tratada.

**Tabla No. 2. Valores del Modulo de Young de Capas de Gravas No Tratadas Para el dimensionamiento**

<b>PAVIMENTO DE BAJO TRÁNSITO T1 A T3</b>				
<b>CAPA DE BASE</b>	CATEGORIA 1* $E_{GNT} = 600 \text{ MPa}$ CATEGORIA 2* $E_{GNT} = 400 \text{ MPa}$ CATEGORIA 3* $E_{GNT} = 200 \text{ MPa}$			
<b>CAPA DE SUB-BASE</b> (GNT sub-dividida en sub-capas de 0.25 m de espesor)	$E_{GNT} [1] = k E_{\text{plataforma de soporte}}$ $E_{GNT} [\text{sub-capas } i] = k E_{GNT} [\text{sub-capas } (i-1)]$ k depende de la categoría de la GNT			
	CATEGORÍA	1	2	3
	K	3	2.5	2
$E_{GNT}$ LIMITADA POR EL VALOR INDICADO EN LA CAPA DE LA BASE				
<b>PAVIMENTO TRÁNSITO T4 Y T5</b>				
<b>CAPA DE SUB-BASE</b> (GNT subdividida en sub-capas de 0.25 m de espesor)	$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plataforma de soporte}}$ $E_{GNT} [\text{sub-capas } i] = 3 E_{GNT} [\text{sub-capas } (i-1)]$ $E_{GNT}$ limitada por 360 MPa			
<b>ESTRUCTURA INVERSA</b>	$E_{GNT} = 480 \text{ Mpa}$			
Las diferentes valores del modulo según el tipo de estructura tienen en cuenta el carácter no lineal de las GNT ( Modulo más elevado en capa de base que en la sub-base)				

A falta de ensayos o valores particulares para cada tipo de estos materiales el coeficiente de Poisson tendrá un valor 0.35

#### **1.4.3.3. Pavimentos Asfálticos.**

- **Características Intrínsecas**

Las características mecánicas de los materiales bituminosos dependen de la temperatura y de la frecuencia de la sollicitación, el cálculo debe ser hecho para valores representativos de las condiciones propias del proyecto.

La frecuencia de sollicitación que debe evaluarse es a 10 Hz.

El método de cálculo necesita para representar el comportamiento reversible bajo una carga el valor del modulo de Young E, el coeficiente de Poisson será tomado en promedio alrededor de 0.35.

Para representar el daño por fatiga:

Los datos de la deformación  $\varepsilon_6$   
La pendiente  $b$  de la ley de fatiga

$$\varepsilon/\varepsilon_6 = (N/10^6)^b$$

Los valores de  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_6$  y  $b$  deben ser escogidos del valor de la temperatura equivalente del ciclo térmico anual.

La dispersión en obra cuando se utiliza este tipo de material esta dada por:

**Tabla No. 3. Dispersión Sobre Los Espesores De Los Materiales Asfálticos**

e (cm)	$e \leq 10$	$10 < e < 15$	$15 \leq e$
Sh (cm)	1	$1 + 0.3 (e-10)$	2.5

### 1.5. LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO

Comprende las siguientes etapas :

- **1 Etapa - Predimensionamiento**

Una vez reunidos los datos para el cálculo se procede a una primera selección de la capa de rodadura y a un predimensionamiento de la estructura por referencia con otras vías comparables.

- **2 Etapa - Cálculo de la Estructura**

Se calculan los esfuerzos y las deformaciones por el modelo matemático de la estructura de calzada predimensionada en la etapa uno, teniendo en cuenta que el eje de referencia es de 130 kilo-Newton, cada semi-eje está compuesto por un eje de ruedas gemelas representado por dos cargas que ejercen una presión uniformemente repartida de 0.662 Mpa sobre dos discos de 0.125 m de radio y con una separación entre ejes de 0.375 m.

- **3 Etapa - Verificación en Fatiga de la estructura de las deformaciones del soporte**

La verificación es hecha comparando los esfuerzos y las deformaciones calculadas en la etapa 2 con los valores admisibles. Estos valores límites son determinados en función:

- Del tránsito acumulado sobre el período de cálculo considerado.
- Del riesgo de ruina admitido para este período.
- De las características de resistencia por fatiga de los materiales.
- De los efectos térmicos.

- De los datos de observación del comportamiento de calzadas del mismo tipo.

Este último punto se traduce en la introducción de un coeficiente que se llama ajuste que permite tener en cuenta globalmente todos los efectos que el modelo matemático no puede representar debido a las simplificaciones hechas y de otra parte a la representabilidad de los ensayos de laboratorio que describen las propiedades de los materiales.

- **4 Etapa - Ajuste de los espesores calculados**

Los espesores de capa determinados siguiendo la etapa tres deben ser ajustados para:

- Tener en cuenta las facilidades tecnológicas de hacer espesores mínimos y máximos que dependen de los equipos que se utilicen.
- Reducir los riesgos de defectos de la liga entre las interfaces y limitar el número de capas
- Asegurar una protección suficiente de las capas tratadas para tener en cuenta fenómenos como el de las fisuras particulares que no pueden ser determinadas en base al modelo matemático

## **1.6. DISEÑO PARA LAS DIFERENTES FAMILIAS DE ESTRUCTURAS DE CALZADAS**

En este capítulo para cada técnica se explica la metodología.

- La modelización retenida para los cálculos.
- Los criterios retenidos para el diseño.
- Las etapas de metodología de dimensionamiento.

Cada representación se ilustra por un ejemplo.

- **Verificación común de la subrasante y de las capas no ligadas**

Estos criterios comunes, indicados para las diferentes estructuras no serán repetidos en los párrafos siguientes:

- **Suelo Soporte**

Para las diferentes estructuras de la calzada se verificará que el Ahuellamiento permanezca inferior al valor retenido como admisible. A falta de otros datos se tomará esta verificación teniendo en cuenta los criterios sobre la deformación vertical  $\varepsilon_z$  de la forma  $\varepsilon_{z,ad} = f(NE)$ :



### **CALZADAS DE TRANSITO MEDIO A ELEVADO ( $T \geq T3$ )**

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.012 (NE)^{-0.222}$$

### **CALZADAS DE BAJO TRANSITO ( $T < T3$ )**

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.016 (NE)^{-0.222}$$

Para el número de ejes equivalentes se tomará el valor del coeficiente de agresividad de la siguiente tabla.

**Tabla No. 4. Valores del Coeficiente de Agresividad Media según el Tránsito**

<b>Clase</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
<b>CAM</b>	0,4	0,5	0,7	0,8	1

- **Capas Granulares**

En el caso de calzadas de tránsito bajo (Tránsito acumulado inferior a 250.000 ejes estándar) compuestos de una capa de rodadura de pequeño espesor sobre una capa granular no tratada no se introducirá el criterio de cálculo para el material de la capa.

En los otros casos la calzada bituminosa sobre la fundación en grava no tratada en el caso de la estructura inversa se procederá a hacer la verificación del ahuellamiento en la parte alta de la capa granular no tratada según los criterios retenidos para este mismo tipo de capas y los retenidos para el suelo soporte.

#### **1.6.1. LAS CALZADAS FLEXIBLES Y LAS CAPAS ASFALTICAS GRUESAS**

El método cubre el dimensionamiento de las calzadas definidas como flexibles y bituminosas gruesas.

- **Modelización de la estructura de la calzada**

La estructura está representada por un modelo multicapas elástico, las capas están pegadas entre si (Continuidad de los desplazamientos en las interfases).

El Modulo de Young afecta la grava no tratada y varía según la naturaleza de la capa, el espesor de la capa de fundación, la naturaleza del suelo soporte y la calidad de la grava.

##### **1.6.1. 1. Criterios Retenidos Para el Dimensionamiento**

- **Caso de calzadas con tránsito pequeño**

Este es el caso de las calzada constituidas por una capa de rodadura delgada sobre una capa de grava no tratada cuyo tránsito es del orden de 250.000 ejes estándar.

La capa de rodadura puede ser un tratamiento superficial simple hasta un tránsito equivalente NE de 100.000 ejes o un concreto bituminoso cuyo espesor se puede escoger de los ábacos. El espesor de la capa de base de grava no tratada se puede fijar en 15 cm si el tránsito acumulado de ejes equivalentes es inferior a 100.000 ejes. El espesor de la grava no tratada se determina en función del ahuellamiento del suelo soporte. El criterio a verificar está en función de la deformación vertical  $\varepsilon_z$  en la superficie del suelo soporte y debe ser en todo caso inferior al valor límite. El buen comportamiento de la grava no tratada se garantizará única y exclusivamente en el momento en que las especificaciones sobre los materiales sean respetadas y que la capa de rodadura garantice la impermeabilidad.

- **Caso de otras calzadas flexibles y capas asfálticas gruesas**

Para las calzadas con fundación en grava recompuesta humedecida no tratada el espesor del material granular está fijado en función de la importancia de la plataforma. Para asegurar el perfecto funcionamiento se debe verificar la ruptura por fatiga en la base de las capas bituminosas y el ahuellamiento de las capas no ligadas y del soporte. Esto quiere decir que se debe verificar que la deformación  $\varepsilon_t$  en la base de las capas bituminosas permanece inferior a un valor admisible y que la deformación  $\varepsilon_z$  en la superficie de las capas no ligadas y de suelo soporte también será inferior a un valor límite.

Determinación de la deformación admisible  $\varepsilon_{t,ad}$  admisible en la base de las capas bituminosas

El valor de  $\varepsilon_{t,ad}$  está dado por la relación:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon (NE, \theta_{eq}, f) k_r, k_c, k_s$$

$\varepsilon (NE, \theta_{eq}, f)$  : Es la deformación para la cual la ruptura convencional por flexión sobre la probeta es obtenida al fin de los NE ciclos con una probabilidad de falla del 50% para una temperatura equivalente  $\theta_{eq}$  y a la frecuencia  $f$  característica de las sollicitaciones exigidas a la capa considerada.

La ley de fatiga para los materiales bituminosos está representada por una relación del tipo:

$$\varepsilon (NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6 (\theta_{eq}, f) (NE/10^6)^b$$

Para las estructuras en clima cálido y para las temperaturas altas a falta de datos experimentales se aconseja tener en cuenta que la influencia de la temperatura sobre el comportamiento en fatiga está representada por la relación:

$$\varepsilon_6 (\theta) E (\theta)^{0.5} = \text{constante}$$

La ley de fatiga generalmente se establece experimentalmente para una temperatura de 10° C y a una frecuencia de 25 Hz, usualmente se considera que para las capas la frecuencia característica de las sollicitaciones es del orden de 10 Hz y que la corrección de la frecuencia sobre 10 y 25 Hz sobre un valor de  $\varepsilon_6$  puede ser despreciada para las temperaturas promedio.

En estas condiciones  $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$  se determina bajo la forma:

$$\varepsilon (NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6 (10^\circ C, 25Hz) [E(10^\circ C/E(\theta_{eq}))]^{0.5} (NE/10^6)^b$$

Estas hipótesis iniciales no son aceptables cuando las temperaturas son muy elevadas y la frecuencia característica de las sollicitaciones es diferente (Tránsito lento para capas de superficie), los materiales tienen una reología que se aparta de los productos bituminosos tradicionales, la expresión de  $\varepsilon (NE, \theta_{eq}, f)$  se deduce de los resultados de los estudios de fatiga en el Laboratorio.

$k_r$  es un coeficiente que se ajusta al valor de la deformación admisible del riesgo de cálculo retenido en función de los factores de dispersión sobre el espesor y sobre los resultados de los ensayos de fatiga.

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

u: Variable centrada reducida asociada al riesgo r

b: Pendiente de la ley de fatiga del material (Ley Bi-logaritmica)

$\delta$ : Desviación standard de la distribución del logN a la ruptura

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0.5}$$

c: Coeficiente que tiene en cuenta la variación de la deformación y la variación aleatoria del espesor de la calzada,  $\Delta h$  ( $\log \varepsilon = \log \varepsilon_0 - c \Delta h$ ) para las estructuras corrientes esta es del orden de  $0.02 \text{ cm}^{-1} = C$

Para un riesgo de calculo del 50%,  $u = 0$  y  $k_r = 1$ .

$K_c$  es un coeficiente de ajuste destinado a calibrar los resultados del modelo de cálculo en base al comportamiento de calzadas del mismo tipo. Para las calzadas bituminosas los valores retenidos del coeficiente de ajuste según la naturaleza del material bituminoso se precisan en la tabla siguiente:

**Tabla No. 5. Valor De Coeficiente  $K_c$**

Material	$k_c$
Grava-bituminosa	1.3
Concreto-bituminoso	1.1
EME	1

$K_s$  es un coeficiente de corrección que tiene en cuenta el efecto de las heterogeneidades locales de la capacidad portante de la capa de baja rigidez que soporta a las capas tratadas.

**Tabla No. 6. Valor de Coeficiente  $K_s$**

Modulo	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} \leq E < 120 \text{ Mpa}$	$120 \text{ MPa} \leq E$
$k_s$	1/1.2	1/1.1	1

**Nota:** El módulo a considerar es del material de la capa subyacente y no aquel que caracteriza la rigidez de la capa de la sub-rasante. Con una capa de forma gruesa el módulo es superior a 120 MPa aún si la portancia de la plataforma del soporte de la calzada es inferior a estos 120 MPa.

### 1.6.1. 2. Ejemplos de Dimensionamiento

- **EJEMPLO No. 1**

- **Calzada flexible con bajo tránsito**

DATOS

- Tránsito

Para un tránsito que se comporta entre 25 a 50 MJA con una tasa de crecimiento geométrico de 4% por año y una duración inicial de 12 años se tiene:

Coeficiente de agresividad media del tránsito CAM = 0.5

Tránsito acumulado en la vía N =  $1.94 \times 10^5$

Numero de ejes equivalentes NE =  $0.97 \times 10^5$

- Capa de Superficie

Para este Tránsito acumulado es posible hacerlo con un tratamiento superficial simple.

- Plataforma soporte

$$E = 20 \text{ MPa} \quad \nu = 0.35$$

- Característica mecánicas de los materiales

Para la capa de base se tiene una grava no tratada:

$$E = 600 \text{ MPa} \quad \nu = 0.35$$

El espesor de la capa de base se toma igual a 15 cm.

Para la capa de fundación se tiene una grava no tratada cuyo Módulo de Young para un espesor de 25 cm, de subcapas varía así:

$$E1 = 2.5 E_{\text{suelo}} = 50 \text{ Mpa}$$

$$E2 = 2.5 E_1 = 125 \text{ Mpa}$$

$$E3 = 2.5 E_2 = 312 \text{ Mpa}$$

$\nu = 0.35$  para todas las GNT (capas de grava no tratada)

- Condiciones de realización

Las interfaces están todas pegadas.

- Valores Límites Admisibles

Suelo Soporte deformación vertical  $\varepsilon_{z,ad}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z,ad} &= 0.016 (NE)^{-0.222} \\ &= 1250 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

- Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones:

El espesor de la grava no tratada de la capa de fundación es el único parámetro que se debe calcular.

**Tabla No. 7. Deformación En La Superficie Del Suelo Soporte**

<b>Espesor de GNT de la fundación ( cm )</b>	52	54
<b><math>\varepsilon_z</math> en la superficie del suelo ( en <math>10^{-6}</math> )</b>	1270	1190

- Dimensionamiento

Teniendo en cuenta que el valor admisible de  $1250 \times 10^{-6}$  para la deformación vertical del suelo soporte la estructura de la calzada se podrá constituir de un tratamiento superficial sobre 15 cm de grava no tratada para la capa de base y 53 cm de grava no tratada en la capa de sub-base. Si se hubiera escogido una capa de rodadura hecha en 4 cm de concreto bituminoso (  $E = 5.400 \text{ MPa}$  a  $15^\circ\text{C}$  ) el cálculo indica que sería suficiente 38 cm de grava no tratada en la capa de la fundación.

- **EJEMPLO No. 2**

- **Calzada en grava bituminosa gruesa**

**DATOS**

- Tránsito

MJA = 210 Vehículos pesados por día con una tasa de crecimiento geométrico de 7 % por año.

Duración inicial 20 años.

Coefficiente de agresividad media del tránsito CAM = 1

Tránsito acumulado para el carril de diseño N =  $3.14 \times 10^6$

Numero de ejes equivalente NE =  $3.14 \times 10^6$

Riesgo de cálculo  $r = 12\%$

- Capa Superficial

El tránsito del ejemplo tiene una capa en concreto bituminoso de 6 cm de espesor.

- Plataforma soporte PF3

$$E = 120 \text{ MPa}, \nu = 0.35$$

- Características mecánicas de los materiales bituminosos

La temperatura equivalente de materiales bituminosos se escoge para 15°C, de los ensayos de laboratorio del material tenemos:

**Tabla No. 8. Características de los materiales**

	E(10°C,10Hz) (MPa)	E(15°C,10Hz) (MPa)	$\epsilon_6(10^\circ\text{C},25\text{Hz})$	b	SN
<b>GB clase 3</b>	12 300	9 300	$90 \times 10^{-6}$	- 0.2	0.30
<b>BB</b>	7 200	5 400	$150 \times 10^{-6}$	- 0.2	0.25

Coefficiente de Poisson de materiales bituminosos  $\nu = 0.35$

- Condiciones de Realización

Las interfaces son todas pegadas.

La dispersión para los espesores de las capas son :

Sh BB = 1 cm

Sh GB = min [ max (1; 0.3h - 2); 2.5] cm.

- Datos de Corrección

$$\begin{aligned} \text{BB } k_c &= 1.1 \\ \text{GB } k_c &= 1.3 \end{aligned}$$

**materiales no tratados deformación vertical  $\varepsilon_{z,ad}$**

Suelo:  $\varepsilon_{z,ad} = 0.012 (\text{NE})^{-0.222}$   
 $\varepsilon_{z,ad} = 433 \times 10^{-6}$

**materiales bituminosos deformación horizontal  $\varepsilon_{t,ad}$**

Concreto bituminoso. Deformación horizontal  $\varepsilon_{t,ad}$  :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \varepsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) &= 150 \times 10^{-6} (7200/5400)^{0.5} (3.14 \times 10^6 / 10^6)^{-0.2} \\ &= 138 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

riesgo = 12%

$$u = -1.175; \quad b = -0.2$$

$$c = 0.02$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0.5} = (0.0725)^{0.5} = 0.269$$

$$k_r = 10^{-0.0632} = 0.864$$

$$k_c = 1.1$$

$$k_s = 1$$



$$\varepsilon_{t,ad} = 131 \times 10^{-6}$$

**Grava bituminosa, deformación horizontal  $\varepsilon_{t,ad}$  :**

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_{t,ad} = \varepsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s$$

$$\begin{aligned} \varepsilon (\text{NE}, \theta_{eq}, f) &= 90 \times 10^{-6} (12300/9300)^{0.5} (3.14 \times 10^6 / 10^6)^{-0.2} \\ &= 82 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$

riesgo = 12%

$$u = -1.175$$

$$b = -0.2$$

$$c = 0.02$$

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2) Sh^2]^{0.5} = 0.391 (\text{si } h_{GB} \geq 15 \text{ cm.})$$

$$k_r = 10^{-0.091} = 0.810$$

$$k_c = 1.3$$

$$k_s = 1$$

→  $\epsilon_{t,ad} = 86 \times 10^{-6}$  (si  $h_{GB} \geq 15$  cm.)

**Tabla No. 9. Tabla Recapitulada De Valores Admisibles**

<b>BB<math>\epsilon_{t,ad}</math></b>	<b>GB<math>\epsilon_{t,ad}</math></b>	<b>sol<math>\epsilon_{z,ad}</math></b>
131 x 10 <sup>-6</sup>	86 x 10 <sup>-6</sup>	433 x 10 <sup>-6</sup>

- Cálculo de esfuerzos y deformaciones.

Si las interfaces entre la rodadura, la base, la sub-base y la fundación están ligadas, es suficiente examinar la deformación horizontal en la base de la capa de la fundación y de la deformación vertical en la superficie del suelo soporte. El espesor de la capa de rodadura está fijado en 6 cm de concreto bituminoso, siendo el espesor de grava bituminosa el único parámetro que nos falta por calcular. Los resultados se encuentran en la tabla que sigue a continuación:

**Tabla No. 10. Deformaciones En La Estructura De La Calzada Bituminosa (Cálculo De Predimensionamiento)**

<b>Espesor de la grava bituminosa ( en cm)</b>	17	18	19
<b><math>\epsilon_t</math> en la base de GB (en 10<sup>-6</sup>)</b>	89	84	79
<b><math>\epsilon_z</math> en la superficie del suelo (en 10<sup>-6</sup>)</b>	284	265	248

- Dimensionamiento

El cálculo indica un espesor mínimo de 18 cm de grava bituminosa. Como el espesor de las capas debe estar comprendido entre 10 y 15 cm para una grava bituminosa 0/20, es necesario hacer dos capas de 10 cm o sea un espesor total más grande que el estrictamente necesario.

La obtención de una capa de fundación de calidad en 10 cm de espesor es bastante complicada puesto que se necesita un muy buen nivelamiento de la plataforma de soporte por lo que es aconsejable reconsiderar el hecho de que el espesor asumido en la capa de la superficie es muy pequeño y sería mejor hacer una capa en grava bituminosa en una sola capa de 16 cm de espesor como máximo.

Escoger una capa de rodadura compuesta de una capa de concreto bituminoso delgado de 4 cm y una capa de ligante de 6 cm, lo que conduce a los resultados que se encuentran en la tabla siguiente:



**Tabla No. 11. Deformación En La Nueva Estructura De La Calzada Bituminosa (Cálculos De Verificación)**

<b>Espesor de la grava bituminosa</b>	13	14	15
$\varepsilon_t$ en la base de GB (en $10^{-6}$ )	92	86	81
$\varepsilon_z$ en la superficie del suelo (en $10^{-6}$ )	294	274	257

La solución con 14 cm de grava bituminosa, 6 cm de concreto bituminoso de liga y 4 cm de concreto bituminoso de rodamiento da unas deformaciones inferiores a los valores admisibles. Esta estructura que contiene el mismo número de capas que la estructura 6BB/10GB/10GB se presta mejor a la obtención de buenos resultados en la realización de una buena compactación y de una buena nivelación.

## 1.7. CÁLCULO DE LA AGRESIVIDAD DEL TRÁNSITO

Este anexo describe el modo de cálculo de la agresividad del tránsito cuando se conoce la repartición de las cargas pesadas y los ejes que lo componen.

Los histogramas de carga por tipo de eje se determinan con la ayuda de estaciones de pesada compuestas de sistemas de cables piezo-eléctricas asociadas con cierres electromagnéticos que permiten pesar los vehículos en marcha.

### 1.7.1. AGRESIVIDAD DE UN EJE

La agresividad  $A$ , se estima en función del daño por fatiga que se ocasiona a la calzada. Esta corresponde al daño provocado por el paso de una carga  $P$  con respecto al paso del eje estándar de referencia  $P_0$ , la agresividad se calcula por la fórmula:

$$A = K \left( \frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

$K$  es un coeficiente que permite tener en cuenta el tipo de eje (simple, tandem, tridem). Un eje se considera aislado cuando la distancia con respecto al eje vecino es superior a 2 m.

$K$  y  $\alpha$  dependen de la naturaleza del material de la estructura de la calzada, los valores medios se indican en la siguiente tabla:

**Tabla No. 12. Valores De Los Parámetros Para El Cálculo De La Agresividad De Un Eje. (Para Estructuras Nuevas)**

	$\alpha$	K		
		Eje simple	tandem	tridem
<b>Estructura flexible</b>	5	1	0.75	1.1
<b>Estructura semirígida</b>	12	1	12	113
<b>Estructura en concreto</b>				
• placas	12	1	12	113
• concreto armado	12	1	-	-

### 1.7.2. AGRESIVIDAD DE UN PESO PESADO

La agresividad de un peso pesado es igual a la suma de la agresividad de los ejes.

### 1.7.3. AGRESIVIDAD DEL TRÁNSITO.

Conociendo el histograma de las cargas repartidas por rango de ejes para un tránsito dado, la agresividad de este tránsito se califica por el coeficiente CAM, correspondiente a la agresividad media de los pesos pesados que componen el tránsito y comparadas al eje de referencia:

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[ \sum_i \sum_{i=1}^3 K_i n_{ij} \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

NPL: Número de pesos pesados durante el periodo de conteo.

$K_i$ : coeficiente según tipo de eje.

$i=1$  eje simple

2 eje tandem

3 eje tridem.

$n_{ij}$ = número de ejes elementales de tipo  $j$  y de clase  $P_i$ .

Un ejemplo de calculo detallado esta dado a continuación.

### 1.7.4. EJEMPLO DE CÁLCULO DETALLADO DE LA AGRESIVIDAD DE UN TRÁNSITO

Durante cinco días de conteo, una estación de pesado ha contado 805 vehículos pesados:

- 1854 ejes simples
- 436 ejes tandem
- 168 ejes tridem

La repartición de cargas para una estructura de calzada con capas tratadas con ligantes hidráulicos es :

- $\alpha = 12$
- $K_1 = 1$  eje simple
- $K_2 = 12$  tandem
- $K_3 = 133$  tridem

Según la tabla, el efecto de este tránsito es equivalente a  $(535+102+11) = 648$  ejes de referencia de 130 KN, que corresponde a un coeficiente de agresividad media CAM para este tránsito de:

$$CAM = \frac{648}{805} = 0.8$$

**Tabla No. 13. Cálculo del Coeficiente de Agresividad Media - CAM**

CÁLCULO DE LA AGRESIVIDAD DE TRÁNSITO										
Ejes simples				Eje Tandem				Eje Tridem		
Clases de carga	Centro de clase (KN)	Agresividad Centro de clase A	N1	A*N1	Agresividad centro de clase A	N2	A*N2	Agresividad centro de clase A	N3	A*N3
10-30	20	$1.8 \cdot 10^{-10}$	210	$3.78 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	107	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	48	$9 \cdot 10^{-9}$
30-40	35	$1.45 \cdot 10^{-7}$	160	$2.32 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	78	0.0001	$1.5 \cdot 10^{-5}$	34	0.0005
40-50	45	$3 \cdot 10^6$	100	0.0003	$4.2 \cdot 10^{-5}$	66	0.0027	$3.1 \cdot 10^{-4}$	28	0.009
50-60	55	$3.3 \cdot 10^{-5}$	290	0.001	$3.6 \cdot 10^{-4}$	60	0.02	$3.4 \cdot 10^{-3}$	22	0.07
60-70	65	0.00025	280	0.07	0.003	50	0.15	0.028	16	0.45
70-80	75	0.0014	216	0.3	0.02	28	0.56	0.16	14	0.45
80-90	85	0.006	210	1.26	0.08	24	1.92	0.68	4	2.72
90-100	95	0.023	180	4.14	0.3	8	1.8	2.6	2	5.2
100-110	105	0.08	68	5.44	1	6	6	9	0	0
110-120	115	0.23	50	11.5	2.76	5	13.8			
120-130	125	0.62	40	24.8	7.4	2	14.8			
130-140	135	1.57	25	39.25	18.8	1	18.8			
140-150	145	3.7	9	33.3	18.8	1	44.4			
150-160	155	8.25	7	57.75	99	0	0			
160-170	165	17.5	5	87.39						
170-180	175	35.4	2	70.82						
180-190	185	69	1	68.98						
190-200	195	130	1	129.75						
200-210	205	236	0	0						
TOTAL			N1=18 54	535		N2= 436	102		N3=16 8	11

En ausencia de datos de pesada de vehículos se podrá tomar los siguientes valores de CAM.

**Tabla No. 14. Coeficiente de Agresividad según el Tránsito y la Calzada**

<b>COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD SEGÚN EL TRÁNSITO Y TIPO DE CALZADA</b>					
	CAM	0.4	0.5	0.7	0.8
Bajo tránsito	Clase	T2	T3	T4	T5
Calzadas tránsito medio y alto	CAM	0.8	1	1.3	
		Capas hidrocarbonadas estructura mixta e inversa	Calzadas bituminosas > 20 cm Capas no ligadas y suelo soporte	Capas de materiales tratados con ligantes hidráulicos Y concretos	

En ausencia de mayores estudios se aconseja tomar los siguientes riesgos de falla para los pavimentos.

**Tabla No. 15. Valor del Riesgo en función del Tránsito y el Material**

<b>Tránsito</b>	<b>T5</b>	<b>T4</b>	<b>T3</b>	<b>T2-T1</b>
Grava-bituminosa	2%	5%	12%	25%
Grava hidráulica	2.5%	5%	7.5%	12%

## **2. BIBLIOGRAFÍA**

FREDY REYES LIZCANO. Diseño de Pavimentos por Métodos Racionales. Tomo I. Universidad de los Andes, Santafé de Bogotá, 1998.  
 MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA SANTA FE DE BOGOTA del INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO IDU y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Revisión 2 de 1997, y Revisión 3 de 2001.  
 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSEE, GUIDE TECHNIQUE, LCPC Decembre de 1994.  
 MECANIQUE DES CHAUSSEES, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussees, 1985.